

Capítulo IV

Resultados del estudio

4.1 Los esquemas tradicionales de evaluación: rmse

4.1.1 Evaluación de la temperatura

En general, el MM5 es capaz de reproducir las condiciones diarias del tiempo meteorológico en forma cualitativa. Sin embargo, un análisis cuantitativo comienza a exhibir errores tanto sistemáticos como aleatorios.

En primer lugar, existe un error sistemático en las predicciones de temperatura máxima y mínima. La temperatura máxima pronosticada por el modelo ocurre en las horas en las que los resultados del modelo son almacenados. Como ejemplo del tipo de diferencias entre la temperatura observada y la simulada, podemos analizar el caso de las estaciones Merced, Tacuba y Tlalpan para los días 10 y 11 de julio del 2001 cuando se asimilan datos para condiciones iniciales (Fig. 25).

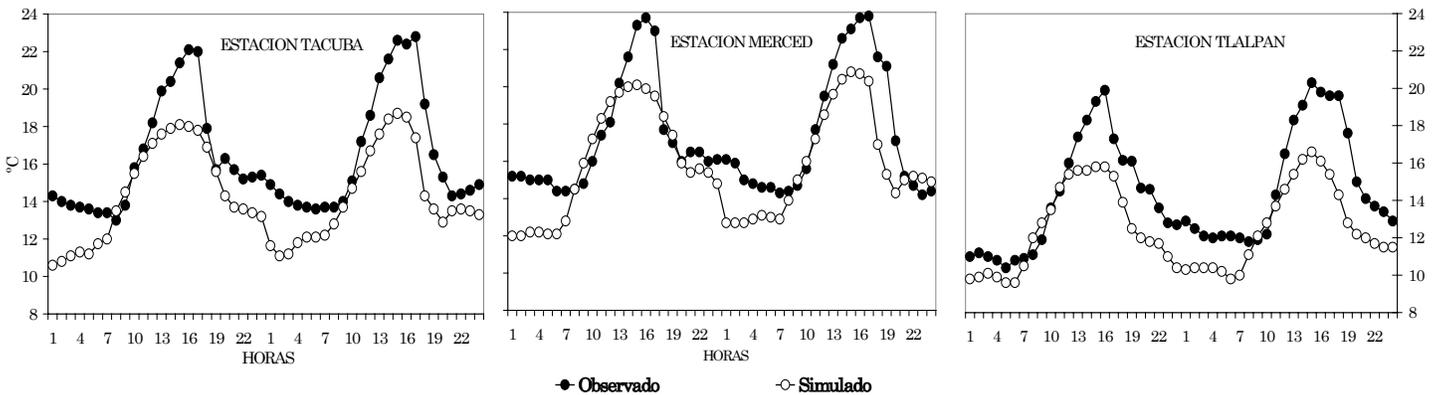


Fig. 25 Comportamiento de la temperatura el 10 y 11 de julio del 2001 en las estaciones Tacuba, Merced y Tlalpan.

El modelo muestra que al tiempo que ocurre la temperatura máxima, ésta coincide en general con la observada. Existe sin embargo, una subestimación de alrededor de 2° o 3° C en el valor pronosticado como temperatura máxima. Dicho error es sistemático en la mayoría de las estaciones. En este sentido, las temperaturas mínimas también son

subestimadas. Físicamente, las fallas en la parametrización de las nubes y la radiación resultan en errores tanto en temperaturas máximas como mínimas, ya que en estas latitudes y época del año, el balance radiativo es el principal modulador de la temperatura. El contenido de vapor de agua y la nubosidad son elementos esenciales en el balance radiativo, sin embargo, la nubosidad es uno de los elementos más difíciles de modelar.

La segunda fuente de error está asociada a las diferencias en la altura del punto bajo análisis. Los datos de la topografía que usa el modelo, al ser resultado de una interpolación a los puntos del dominio, están generalmente suavizados con respecto de la topografía real del lugar. Las alturas en el modelo en un punto correspondiente a una estación, sean mayores o menores en varias decenas de metros a las reales. Si se considera que por cada 100 metros existe un gradiente vertical de temperatura de aproximadamente 0.65°C (gradiente adiabático húmedo), los errores en altura de la topografía de varias decenas de metros se traducen en errores sistemáticos reflejados de la temperatura simulada. El rango de errores puede ir de 1 a 3°C sobre la mancha urbana, hasta casi 4°C alrededor de la misma (Fig. 26).

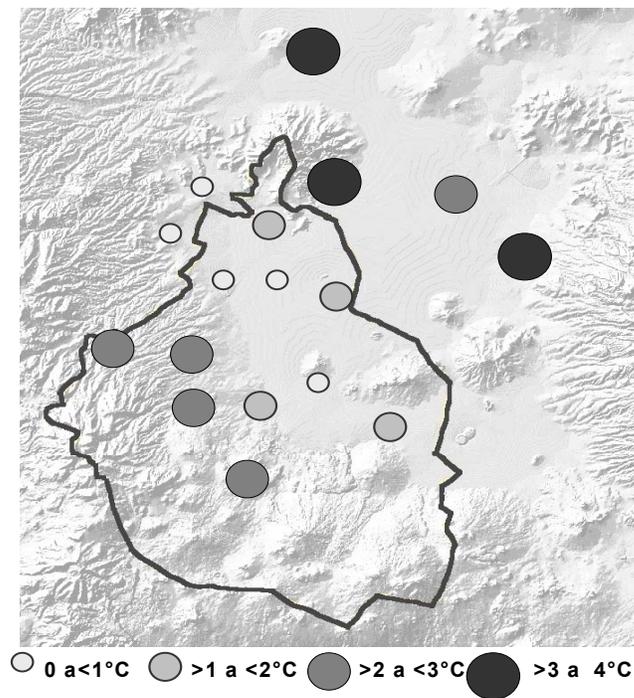


Fig. 26 Diferencias de temperaturas debido a diferencias de altura en los datos de topografía utilizados en el modelo de mesoescala MM5.

Una fuente de error sistemático adicional está asociada a la representación de uso de suelo que se utiliza en el modelo (Fig. 13 y 27). La base de datos que utiliza el MM5 para definir 13 categorías de uso de suelo no siempre corresponde con las características del sitio en donde se encuentra la estación meteorológica que reporta operativamente. De las categorías de uso de suelo descritas en el modelo en su versión 2, el área correspondiente al Distrito Federal está representada en su mayoría por terreno agrícola o para cultivo. En la actualidad la mayoría de las estaciones se encuentran rodeadas por asfalto y son afectadas principalmente por el efecto de la urbanización, lo cual resulta en una tendencia a mayores temperaturas observadas. Sin embargo, la baja resolución espacial de los datos de uso de suelo que utiliza el modelo generalmente indica presencia de vegetación, con lo que las temperaturas de superficie alcanzadas por el modelo son menores.

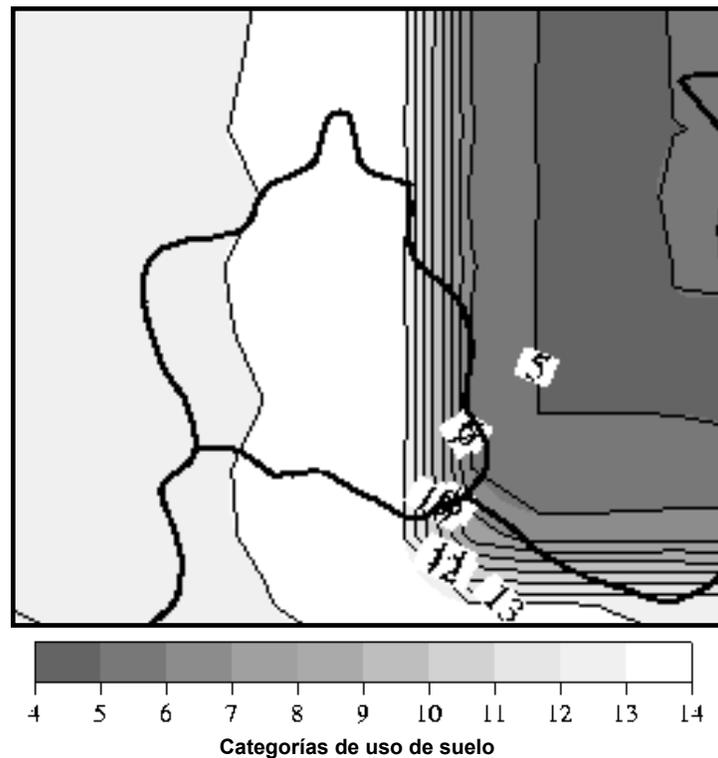


Fig. 27 Representación del uso de suelo en el Distrito Federal utilizado por el MM5 v2. la zona coloreada de blanco (13) corresponde a terreno agrícola o para cultivos.

Para los meses de verano, la amplitud de los errores en las temperaturas máximas (más que las temperaturas mínimas) tiende a incrementarse hacia los meses de septiembre y octubre (Fig. 28).

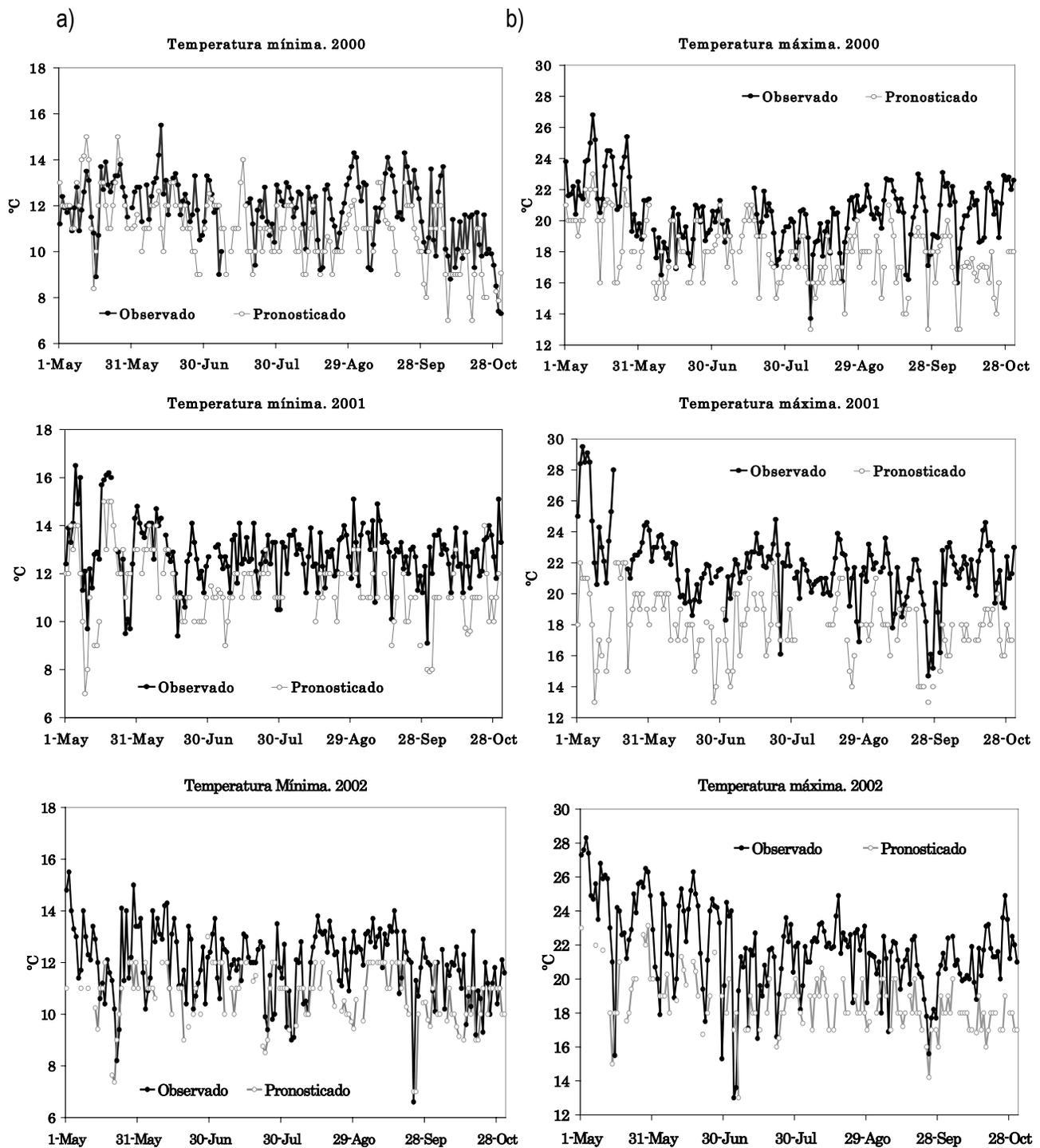


Fig. 28 Series de tiempo de simulaciones a 24 horas y valores observados de a) temperatura mínima, y b) temperatura máxima en el 2000, 2001 y 2002 en la estación Tacuba.

Se tiene la idea de que lo anterior puede estar asociado a la estimación realizada por el modelo sobre la cantidad de radiación global recibida en la superficie y la humedad existente en el suelo.

Considerando la representación del uso de suelo utilizada por el MM5 sobre el Distrito Federal como terreno agrícola, el escenario creado es que el suelo resulta ser mas eficiente en la retención de humedad debida a la lluvia. A su vez, al cambiar el albedo localmente, los valores de temperatura máxima predichos tienden a ser menores que los observados, pues la energía se utiliza en evaporar más que en calentar.

En promedio, el error en la estimación de temperatura máxima en los primeros 3 meses de la temporada de lluvias fluctúa entre los 3 y 4° C, llegando a ser de hasta 6°C en la segunda mitad de la temporada, mientras que el error en las temperaturas mínimas es sistemáticamente de 3°C.

Al comparar los años 2000 y 2001 respecto al 2002, las temperaturas continúan mostrando el mismo patrón. Sin embargo, el sesgo entre lo observado y lo simulado en el 2002 resulta ser más pequeño. Además, las simulaciones logran captar las fluctuaciones o cambios relativamente grandes de temperatura observada.

La reducción del sesgo entre lo observado y lo predicho se traduce en una mejora sustancial de los pronósticos de temperatura. En general, la mejora en las predicciones de temperatura mínima resultan ser más notorias alrededor de la Ciudad que en el centro y zona montañosa. Gran parte de la mejora es consecuencia de la asimilación de los datos de las estaciones de superficie situadas alrededor de la Ciudad, que permite una mejor representación de las condiciones iniciales. La simulación sólo con los datos globales no logra percibir los pequeños cambios locales en los campos de temperatura, por lo que se sobrepone un campo medio en todo el dominio. Lo anterior puede tener repercusiones en la percepción de circulaciones locales debidas a contrastes térmicos de temperaturas en el dominio.

Considerando la asimilación de datos en todo el dominio se puede decir que en general, dentro del periodo de verano y para las predicciones a 24 horas, los errores en la temperatura mínima sobre la Ciudad van de 2 a 2.6° C, y en la máxima de 2.4 a 4.2° C. Cuando la asimilación de datos no es considerada, los errores cometidos se incrementan alcanzando valores de 2.8 a 3.2° C en la temperatura mínima, y de 3 a 6° C en la máxima (Fig. 29).

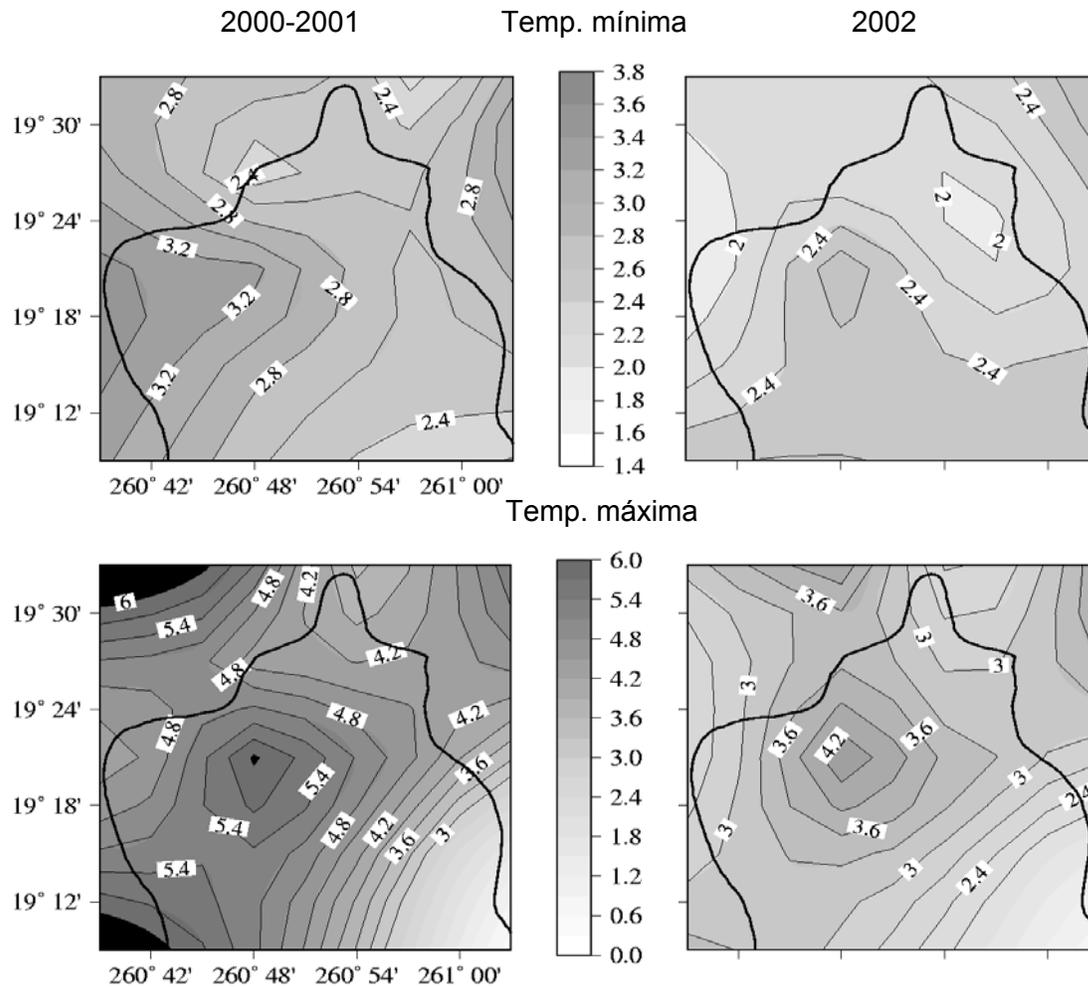


Fig. 29 rms de las predicciones a 24 horas entre mayo y octubre respecto a lo observado de temperatura mínima (arriba) y temperatura máxima (abajo), y considerando la asimilación de datos de superficie (derecha).

Con la asimilación de datos, se corrige parte del error sistemático entre un 20 y 30% al mejorar la condición inicial. Mejoras más profundas requerirán de corregir tanto el uso de suelo como la topografía. Esto podría lograrse mediante un esquema de post-procesamiento del pronóstico numérico.

4.1.2 Evaluación de la precipitación

Es bien sabido que el parámetro mas difícil de pronosticar es la lluvia. El trabajo operativo con el MM5 no está exento de limitaciones, aún cuando cuenta con las mejores y más modernas parametrizaciones de nubes.

Utilizando el *rmse* como una medida de evaluación de los errores en las simulaciones, se puede notar como primera característica que los errores son relativamente menores al inicio y final de la temporada de lluvias, aumentando a la mitad de la temporada por efecto de la ocurrencia de eventos intensos de lluvia, es decir, entre mayores sean las precipitaciones mayor será el *rmse*. La segunda característica está asociada a la distribución espacial de los errores donde existe un gradiente de este a oeste, reflejo de la fuerte componente orográfica de la lluvia en el Valle de México (Fig. 30).

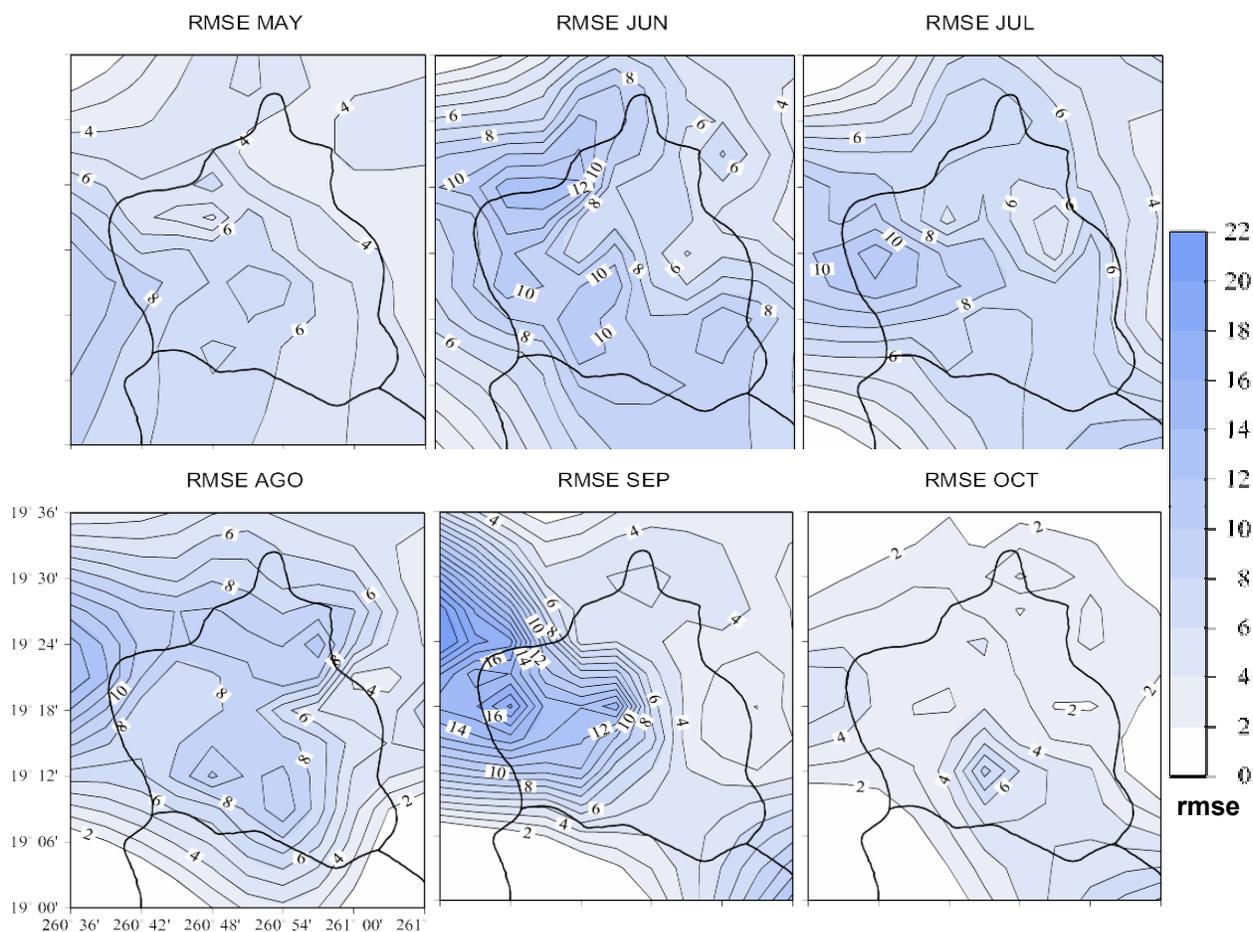


Fig. 30 Errores promedio mensuales de simulaciones a 24 horas de precipitación acumulada. Periodo: 2000-2002.

En general, la distribución de los errores tanto espacial como temporalmente tiene el mismo patrón en cualquier año, fluctuando incluso en los mismos rangos que en promedio van desde los 4 mm/hr o menos sobre la zona urbana hasta los 8 mm/hr o más sobre la zona montañosa del poniente de la Ciudad. Sin embargo, al considerar la asimilación de datos de superficie, el rango de fluctuación de los errores promedio sobre el dominio se reduce a valores de entre 5 a 8 mm/hr (Fig. 31).

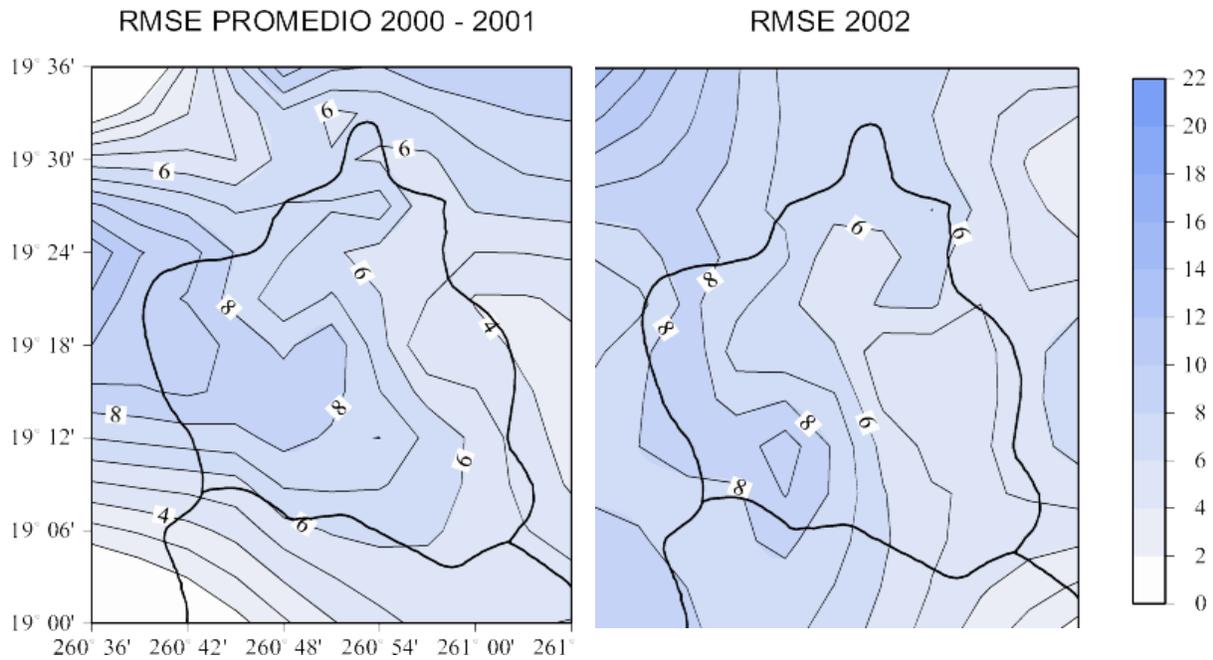


Fig. 31 RMSE promedio de las simulaciones de lluvia acumulada a 24 hrs. de mayo a octubre de 2000-2001 y 2002.

Lo anterior representa en términos generales una mejora de entre el 10 y 30 % en las simulaciones de patrones de lluvia acumulada en 24 hr sobre una gran parte del dominio en análisis, aunque existen zonas donde no necesariamente el resultado es satisfactorio (Fig. 32).

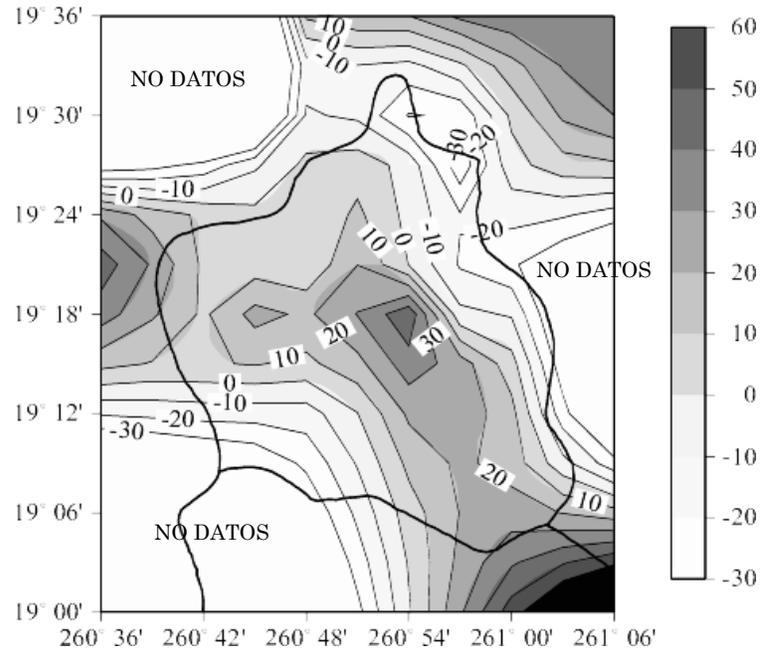


Fig. 32 Porcentaje de mejora respecto al RMSE de 2002 en comparación con el obtenido en 2000-2001.

4.1.3 El Método de 3 puntos

La interpolación a localidades específicas en el dominio permite definir de mejor forma aquellos sitios que pudieran verse afectados por eventos de precipitaciones intensas. Sin embargo, uno de los mayores retos a los que se enfrenta el MM5 bajo este esquema es el de que los valores predichos sean lo más parecidos a los reportados en el punto de análisis. Con el esquema de interpolación propuesto, es posible realizar un pronóstico puntual tal que se pueda evaluar contra el reporte observado. Este es el tipo de información útil para la toma de decisiones en protección civil.

Como caso particular, se analizan las evaluaciones para un punto localizado en Ciudad Universitaria (Fig. 33) en los meses de mayo y julio de 2001. Al considerar los valores para clasificar casos de lluvia intensa (ver Fig. 21, Cap. 3), se encuentra que para mayo no ocurre ningún evento extremo (Fig. 33a). Posteriormente, al ser evaluada la ocurrencia diaria de la lluvia con el criterio propuesto, se logra tener un estimado de la calificación máxima a

alcanzar. Como resultado, las simulaciones del MM5 pueden llegar a obtener 31 de los 40 puntos posibles, es decir, llegan a alcanzar hasta un 77 % de confianza en el pronóstico de lluvia acumulada. Lo anterior puede reflejar la eficacia del MM5 para simulaciones de lluvias sin presencia de eventos intensos.

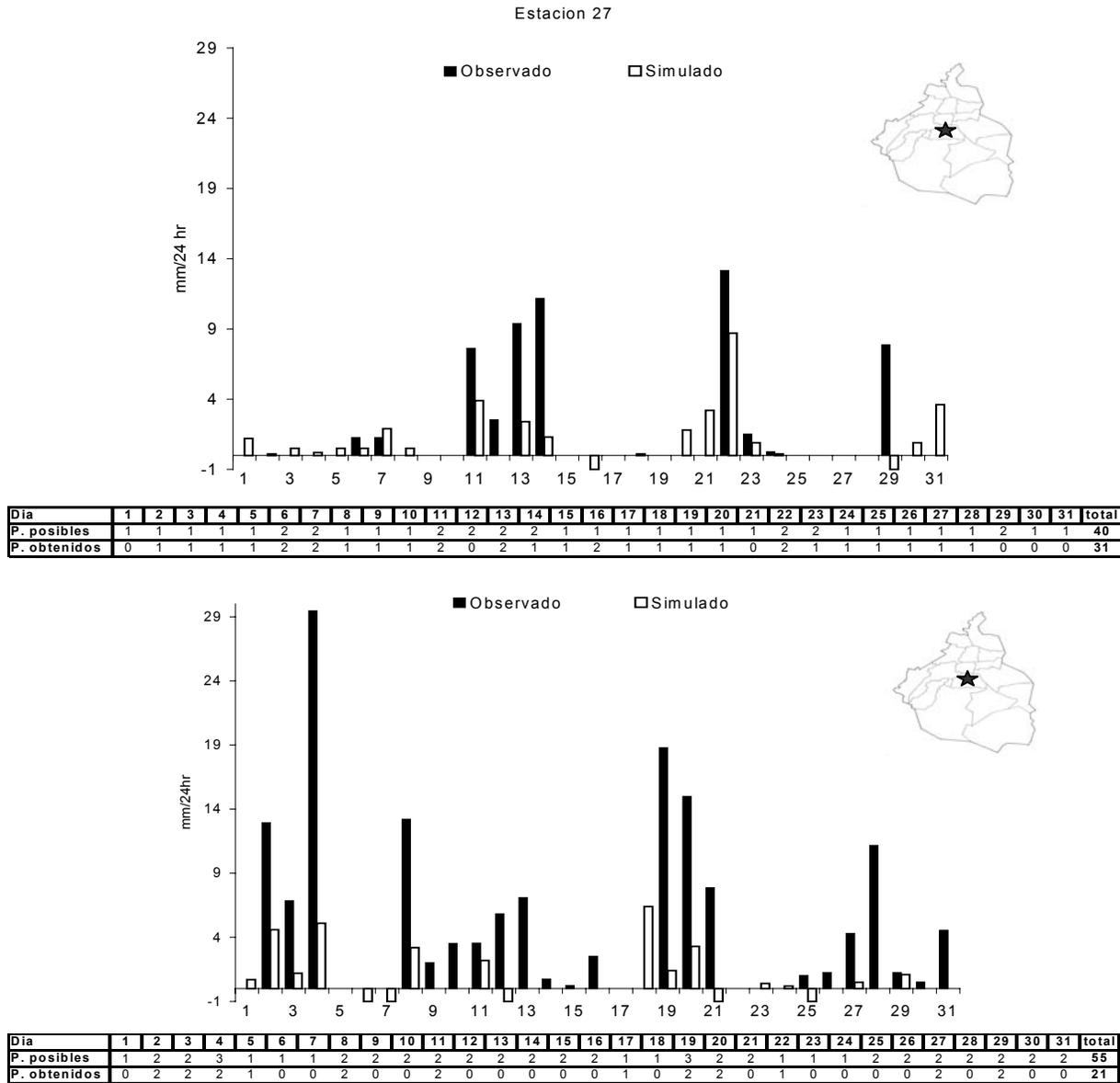


Fig. 33 Comparación de la lluvia acumulada en mayo (arriba) y julio (abajo) de 2001 en la estación 27 (Cd. Universitaria) de la DGCOH. Los datos negativos indican la inexistencia de simulación u observación.

Sin embargo, la situación es distinta conforme avanza la temporada de lluvias. En el mes julio (Fig. 33b), además del aumento en la cantidad de lluvia acumulada, se presentan más casos de lluvias intensas. Al considerar dos eventos de lluvia extrema (4 y 19,

respectivamente) y realizar la evaluación, el MM5 sólo puede alcanzar 21 de los 55 puntos posibles, representando poco menos del 40 % de confianza en las simulaciones. Lo anterior muestra que para las simulaciones del MM5, resulta difícil estimar no sólo la cantidad acumulada de lluvia, sino también la ocurrencia de un evento extremo de lluvia.

Bajo el criterio de “3 puntos” es notable que la confianza en la simulación de lluvia acumulada disminuye conforme la intensidad de las lluvias aumenta. El valor más alto de confianza en los meses de mayo y junio llega a ser de hasta un 50% o 70% en casi toda el área del Distrito Federal. Posteriormente, entre julio y septiembre, meses considerados como los más húmedos, la confianza disminuye a menos del 50% en general, principalmente en las zonas poniente, suroeste y sur (Fig. 34) donde la precipitación es mucho mayor que en otros sitios de la Ciudad por el efecto de la orografía.

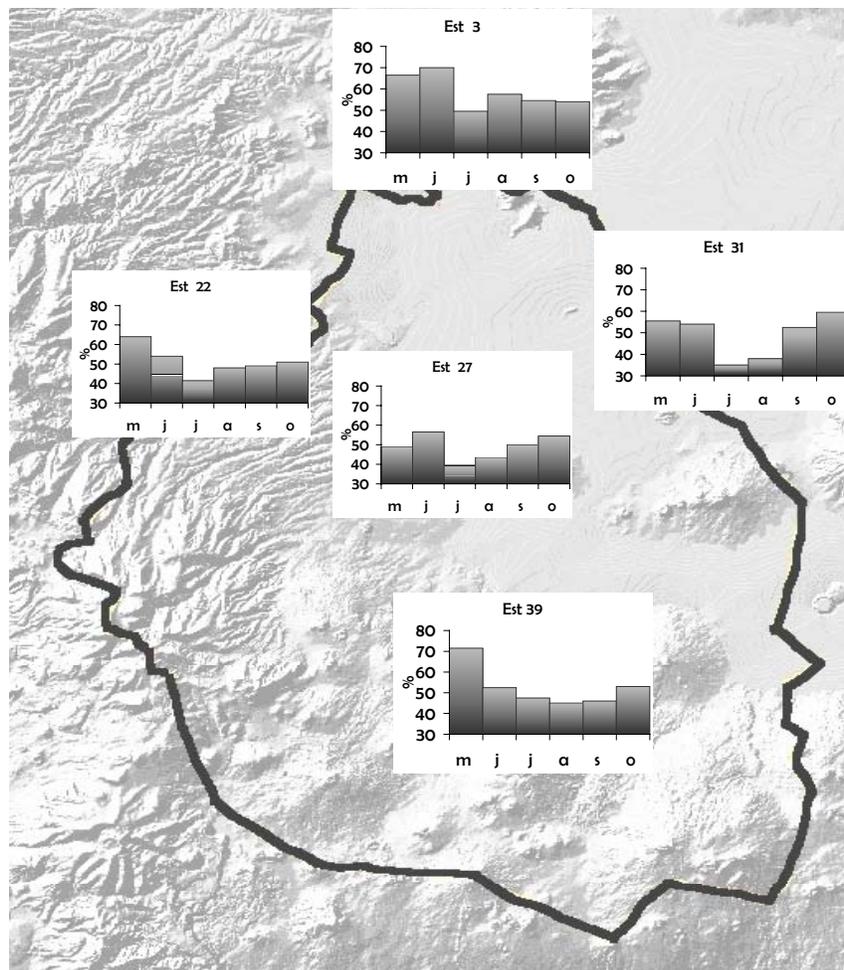


Fig. 34 Confianza (%) en las simulaciones de lluvia acumulada a 24 hrs. Periodo: mayo-octubre de 2000-2002.

Al considerar sólo el criterio de llueve-no llueve, y considerando la asimilación de datos en superficie y radiosondeos, la confianza aumenta casi un 10% para las estaciones centro, norte y oriente, y alrededor del 15 % en las restantes, alcanzando una confianza promedio entre el 40 y 65% durante todo el periodo de lluvias.

4.1.4 Casos particulares de lluvia extrema

Si bien la confianza es considerablemente baja en las simulaciones puntuales del MM5, en términos de simulaciones de patrones de precipitación acumulada en 24 horas sobre el dominio del Distrito Federal resulta ser más confiable y con mayor utilidad para áreas específicas como protección civil.

Por el impacto que las lluvias provocaron, como ejemplo de lo anterior, se considera aquí dos eventos de lluvia intensa (Fig. 35). El primero ocurrido el 27 de junio de 2002 sobre el oriente de la Ciudad con poco más de 100 mm en tan sólo 4 horas, rebasó los registros históricos de los últimos 20 años en la Ciudad, y creó un severo problema de sobresaturación en el sistema de drenaje¹. El segundo caso, ocurrido 10 de septiembre 2003 resultó ser uno de los eventos de lluvias con más afectación en la temporada. Tan sólo para el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, este evento junto con otros dos más ocurridos en otras fechas de septiembre representó alrededor de 19 horas de retrasos en vuelos y afectación a poco más de 89, 000 mil pasajeros y más de 850 vuelos².

Con respecto a las simulaciones de lluvia del MM5 las cuales consideran la asimilación de datos en superficie, en ambos casos resulta visible la incapacidad para reproducir la cantidad de lluvia (aún con un margen de error) sobre la Ciudad. Sin embargo, es de destacarse la buena aproximación del patrón de lluvia simulado respecto del observado, y más aún cuando el evento de lluvia no es forzado por la componente orográfica (Fig. 35a). Si bien la simulación no resulta ser del todo precisa, la información que se obtiene es de gran relevancia para sectores encargados de la seguridad civil.

¹ *Reporte preeliminar de la Dirección General de Protección Civil, GDF, 2002.*

² *Reporte preeliminar de la Comandancia General del Aeropuerto Internacional de la Cd. de México, 2002*

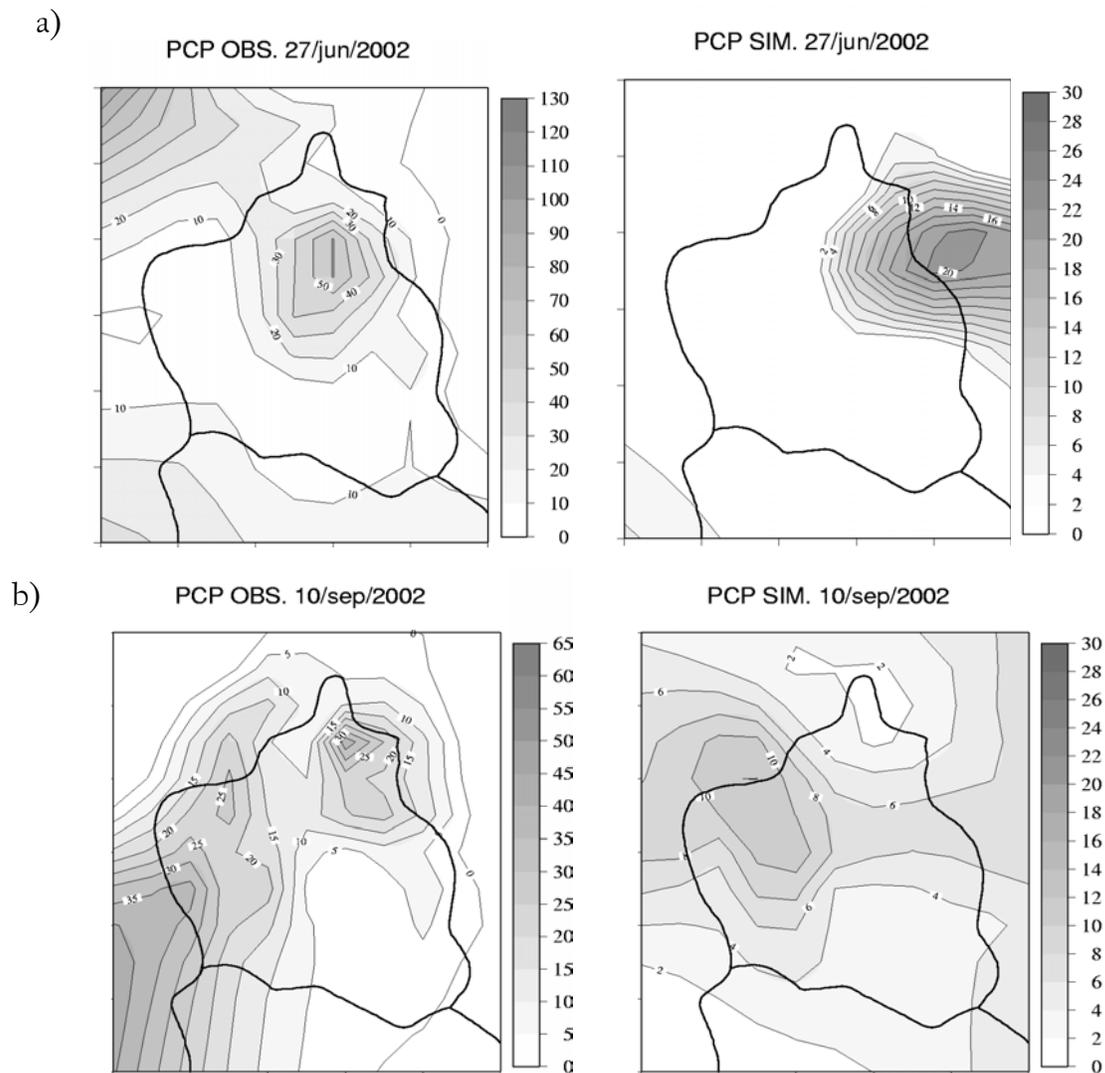


Fig. 35 Eventos de lluvia intensa observado (izquierda) y simulados (derecha) en el Distrito Federal para a) el 27 de junio y b) el 10 de septiembre de 2002.

Gran parte de la mejora que se puede obtener en las simulaciones del MM5 es en el proceso de la asimilación de datos de superficie y de altura. Al sólo ser considerados los datos del modelo AVN como condiciones inicial y de frontera, la simulación de la lluvia acumulada tiende a ser subestimada (Fig. 36).

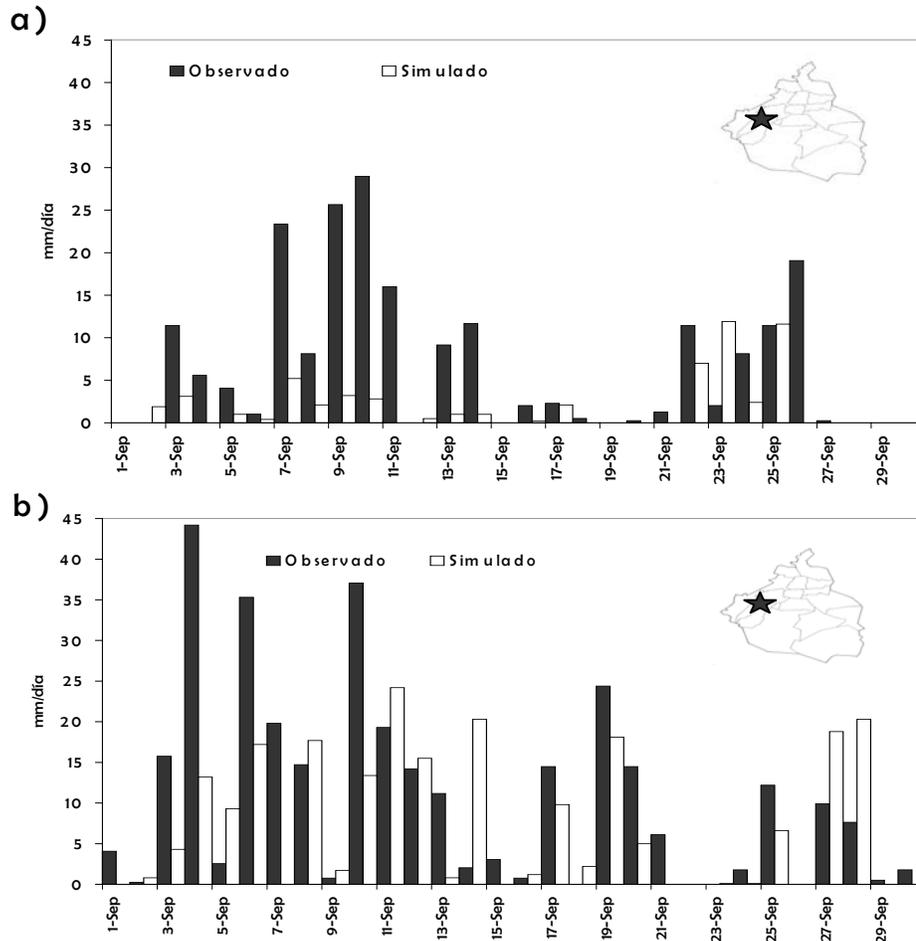


Fig. 36 Comparación entre lo observado y lo simulado de lluvia acumulada a 24 hrs. en septiembre. La figura a) corresponde al 2001 y b) al 2002 que considera la asimilación de datos.

Sin embargo, la asimilación de datos en superficie y de radiosondeos permite una mejora en las simulaciones del MM5, lo cual se aprecia analizando el mes de septiembre del 2001 y 2002, donde sólo en el segundo se consideró la asimilación de datos. Bajo el esquema de “3 puntos”, en el 2001, de los 54 puntos posibles se obtuvieron 31, es decir, la confianza del pronóstico alcanzó un 57%. Sin embargo, para el caso del 2002, se acertaron en 39 de 57 puntos totales, alcanzando el 68% de confianza en los pronósticos. Aunque en ambos casos no se logra captar con suficiente precisión (± 5 mm) la cantidad de lluvia de un evento extremo, el error cometido resulta ser menor que el cometido al no considerar la asimilación de datos (Fig. 36b). Algo a destacar es que mediante la utilización del modelo con fines operativos se pueden realizar pronósticos locales con una incertidumbre menor a los boletines con predicciones a 24 horas de las instancias de gobierno responsables.

4.1.5 Evaluación del viento

Uno de los elementos meteorológicos con gran variabilidad es el viento. Para el caso de la Ciudad de México, esta variable adquiere importancia por estar relacionada con la dispersión de contaminantes que afecta desde hace varios años a la salud de los pobladores.

El MM5, dentro de sus múltiples cualidades, puede generar productos de interés para estudios ambientales, como es el caso de los vientos en superficie en la Cuenca del Valle de México. Sus simulaciones permiten estimar las regiones donde la velocidad de los vientos es intensa y las regiones donde los vientos son débiles. Al igual que la precipitación y la temperatura, los valores puntuales de las variables meteorológicas también se pueden estimar. Se debe considerar que en sólo un par de kilómetros, como es el caso de las estaciones Plateros y Tacuba de la RAMA, los vientos pueden variar casi en un orden de magnitud (Fig. 37). De hecho, el error asociado con la magnitud del viento es similar al mencionado en trabajos como los de Salas (2000) y Shafran et al. (2000) donde se encuentra que el error en la magnitud del viento está entre 2 y 6 m/s. La dirección del viento es en general mejor pronosticada y simulada. Uno de los aspectos que el MM5 reproduce con calidad es el ciclo diario del viento. Por este efecto, en las tardes se crea una circulación anticiclónica sobre el oriente de la Ciudad que puede relacionarse con el inicio de las lluvias.

Por lo anterior, al comparar la simulación con las observaciones interpoladas a una malla de igual resolución espacial a la del MM5, se puede concluir que el modelo es capaz de pronosticar las regiones donde se producirán vientos intensos.

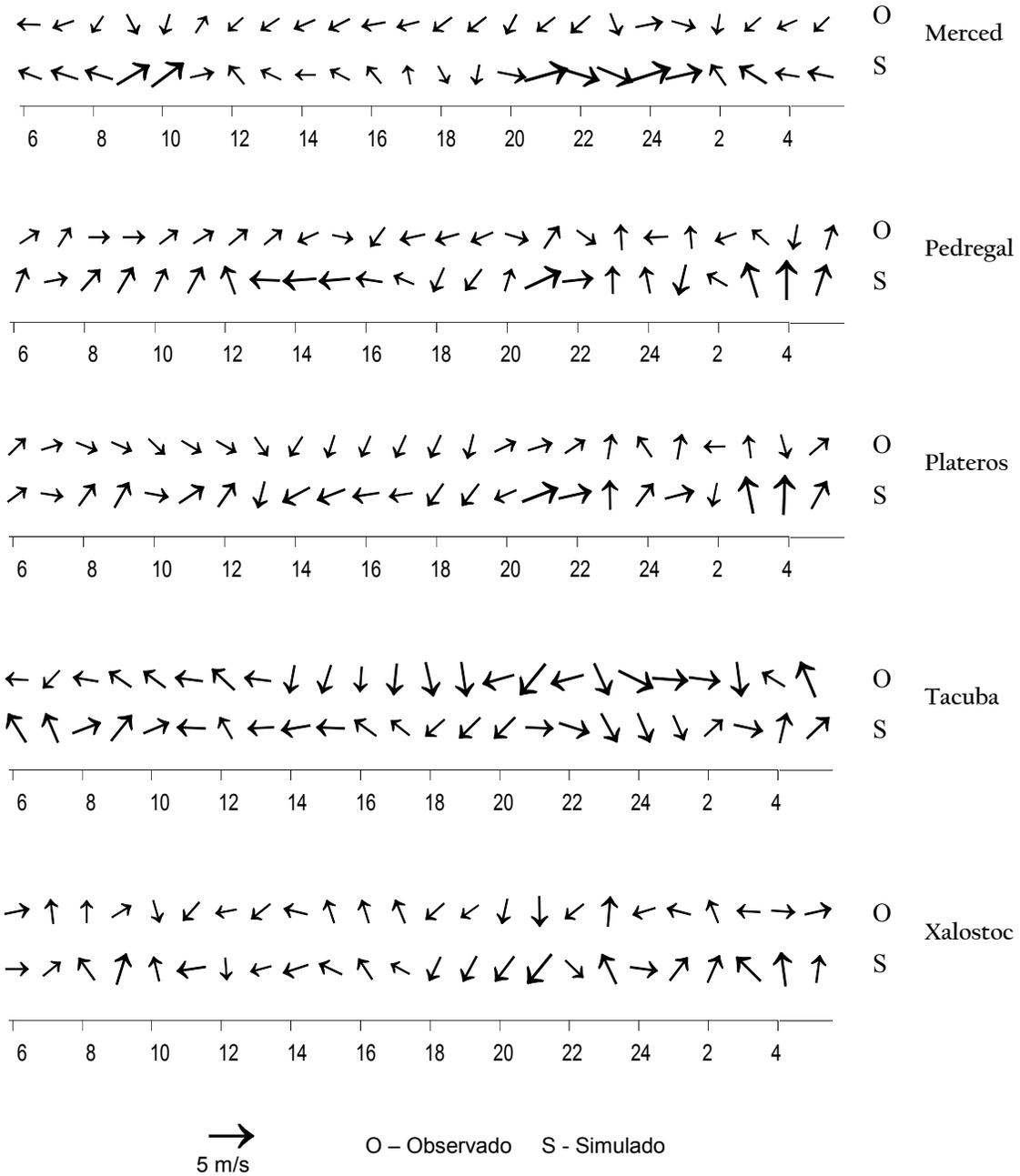


Fig. 37 Simulaciones horarias del viento en superficie, en puntos donde se encuentran estaciones de la RAMA para el 5 de septiembre de 2002.

Una buena base de datos de topografía y de uso de suelo permite que el modelo MM5 sea capaz de reproducir la dirección del viento y las variaciones que éste experimenta a lo largo del día. Los resultados que se obtienen del modelo son cercanos a lo observado cuando la resolución del modelo aumenta. Tal condición se puede alcanzar utilizando mallas anidadas con alta resolución espacial. En experimentos de alta resolución con MM5

(10 km) el modelo simula adecuadamente la dirección de los vientos y su variación diaria. Tal es el caso de simulaciones para el Valle de México, comparadas con reportes de viento de la RAMA vistas en la Fig. 37.

Existe un error sistemático en las magnitudes de viento que puede ser corregido utilizando un procedimiento de post-procesamiento de salidas del modelo y datos de viento. Así, la comparación preliminar utilizando nuevamente los reportes de la RAMA o de los observatorios del SMN permite llegar a ecuaciones de regresión para corregir errores sistemáticos en magnitud.

Mejores simulaciones en los campos permitirán construir modelos de pronósticos de calidad del aire. Por ejemplo, Jazcilevich et al. (2002) ha venido trabajando en el acoplamiento del MM5 a un modelo de emisiones y de calidad del aire para la Ciudad de México que permita obtener pronósticos a 24 y 48 horas. Si esta información se emplea en los programas de gestión ambiental, se podrían reducir las contingencias ambientales.

4.2 Máxima resolución espacial

Los resultados mostrados anteriormente parecerían indicar que a mayor resolución espacial mejores pronósticos. Este no es el caso, pues las parametrizaciones en los modelos numéricos limitan en gran medida la máxima resolución espacial que se pueda utilizar en el modelo.

Uno de los propósitos de este trabajo es estimar que configuración simula de mejor manera los patrones atmosféricos observados. Al analizar la simulación de la precipitación de forma puntual, se encuentra que el error cometido es proporcional a la resolución utilizada en el dominio. En términos generales y considerando que no necesariamente las simulaciones reproducen de forma precisa la cantidad de la lluvia acumulada, la más pequeña de las resoluciones es la que logra captar de mejor forma las características de la lluvia (Fig. 38).

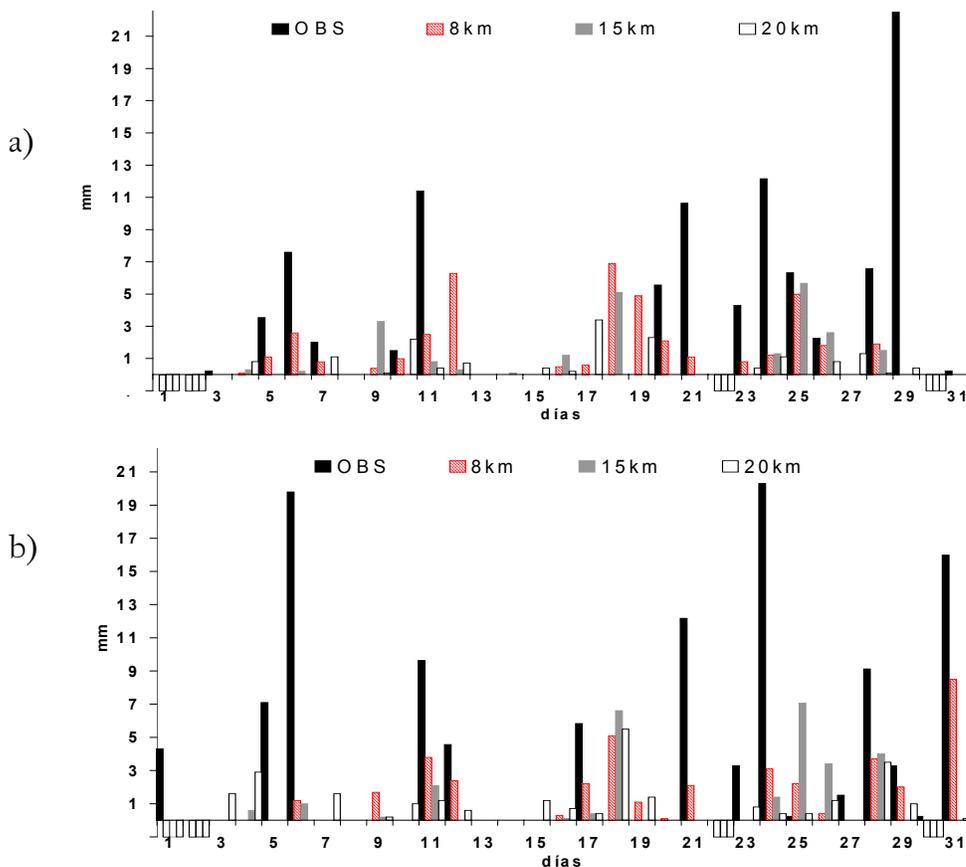


Fig. 38 Comparación entre las predicciones a 24 horas de precipitación acumulada y lo observado en julio de 2000 en las estaciones 3 (a) y 39 (b) (en el sur y norte de la Ciudad, respectivamente) de la DGCOH.

Debido al comportamiento no uniforme de la precipitación, al realizar la comparación entre las configuraciones utilizadas en todo el dominio del Valle de México, se puede observar que los errores cometidos se distribuyen de forma semejante para todos los valores de resolución utilizados. Además, los valores de los errores aumentan del oriente al poniente de la ciudad, tal y como se distribuye la precipitación acumulada en la Ciudad debido al efecto orográfico. Sin embargo, aunque el patrón espacial de errores se mantiene, sobre la parte urbana de la Ciudad estos son menores con una resolución de 8 km con respecto de las demás (Fig. 39).

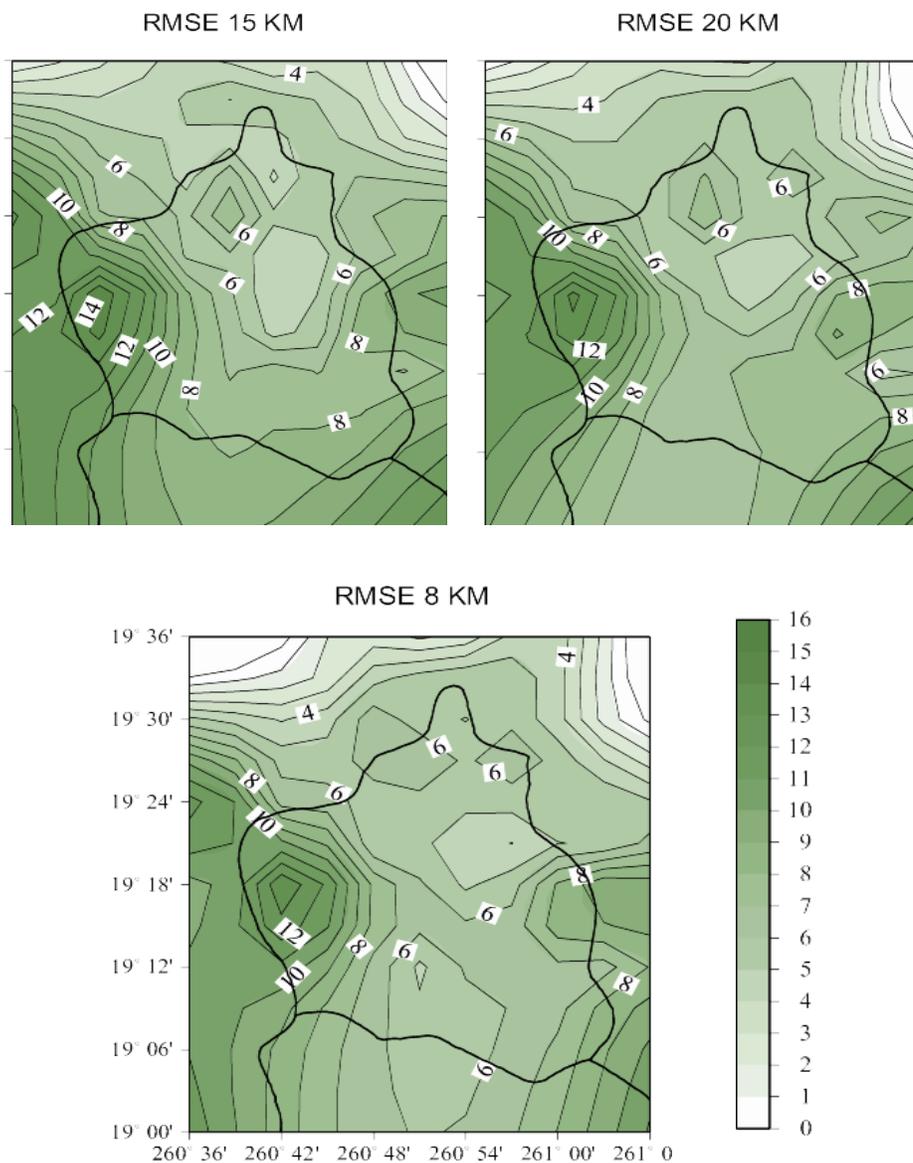


Fig. 39 RMSE de precipitación acumulada a 24 hrs. a 8, 15 y 20 km. respecto a lo observado en junio-agosto de 2000.

4.3 La importancia de la asimilación de los datos en el pronóstico de lluvias

El problema del pronóstico numérico del tiempo es un problema de condiciones iniciales, por lo que pronosticar lluvia con detalle en tiempo y espacio resulta complicado. Para solucionarlo se requiere de mejores parametrizaciones. Si se intenta llevar el problema a resolver explícitamente las nubes, se necesitará un mayor entendimiento de su microfísica. Esto requerirá de que, además de la asimilación de datos en la condición inicial construidos con una densa red de estaciones de superficie, también se cuente con mayor detalle en altura.

Los errores cometidos en las condiciones iniciales de las variables atmosféricas tienen un impacto directo en la cantidad de precipitación. Por ejemplo, errores en la cantidad de humedad pueden resultar en una menor precipitación que la observada. Generalmente, las condiciones iniciales que se utilizan en el pronóstico corresponden a los análisis de escala sinóptica que se elaboran en el *NCEP*. Estos análisis tienen una resolución espacial de $1 \times 1^\circ$ (100 km) en el mejor de los casos, y con frecuencia no incluyen los reportes de radiosondeo de México.

Los análisis de alta resolución (24 km) que el modelo requiere con frecuencia son demasiado suaves y no reflejan lo reportado por la estación de radiosondeo o de superficie. Así, la estabilidad de la atmósfera en una cierta región puede ser menor a lo que en realidad es si sólo se utilizan las condiciones iniciales del modelo de la Aviación *NCEP*. Tal error puede deberse a menor humedad en la columna atmosférica o a un gradiente vertical de la temperatura que no sea el observado, que influyen no sólo en la cantidad de agua precipitable, sino en la estabilidad misma de la atmósfera y por lo tanto en la precipitación que se registra en un sitio.